



Nghiên cứu khả năng hấp phụ - giải hấp của vật liệu hydroxyapatit đối với ion Co^{2+} và thu hồi coban bằng phương pháp kết tủa điện hóa

Research on adsorption – desorption the ability of hydroxyapatite for Co^{2+} ions and recovery cobalt by electrochemical deposition

Lê Thị Duyên^{1,2,3*}, Lê Thị Phương Thảo^{1,2,3}, Đinh Thị Mai Thanh⁴, Nguyễn Thu Phương⁵

¹Bộ môn Hóa học, Khoa Khoa học cơ bản, Trường Đại học Mở - Địa chất, 18 phố Viên, Đức Thắng, Bắc Từ Liêm, Hà Nội

²Nhóm nghiên cứu mạnh HiTech-CEAE, Trung tâm Phân tích, Thí nghiệm Công nghệ cao, Trường đại học Mở - Địa chất, 18 phố Viên, Đức Thắng, Bắc Từ Liêm, Hà Nội

³Nhóm nghiên cứu BSASD, Khoa Khoa học Cơ bản, Trường đại học Mở - Địa chất, 18 phố Viên, Đức Thắng, Bắc Từ Liêm, Hà Nội

⁴Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội- Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

⁵Viện Kỹ thuật nhiệt đới - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

*Email: lethiduyen@humg.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 10/02/2024

Accepted: 25/3/2024

Published: 30/3/2024

Keywords:

Hydroxyapatite, adsorption, desorption, recovery, Co^{2+} ion

ABSTRACT

Hydroxyapatite has a nanostructure with the chemical formula of $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. In this paper, hydroxyapatite is used to study the ability to adsorb Co^{2+} ions. The influence of some factors on Co^{2+} adsorption capacity and efficiency has been studied. Co^{2+} adsorption efficiency and capacity reached 85.08% and 6.38 mg/g under the suitable conditions: hydroxyapatite mass of 0.2 g/50 mL solution, 50 mg/L initial Co^{2+} concentration, pH 5.0, exposure time of 30 minutes at room temperature (25°C). The process of desorption of Co^{2+} from the loaded adsorbent and recovery of metallic Co was also studied. Cobalt recovery efficiency reached 94.58% under appropriate conditions: applied current 7.5 mA, electrolysis time of 10 hours, loaded hydroxyapatite mass of 0.1 g, temperature 60°C. After desorption process, the adsorbent was regenerated for further studies. The adsorption isotherm was studied based on two Langmuir and Freundlich models. The adsorption kinetics were examined using two pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models.

1. Giới thiệu chung

Coban là một nguyên tố vi lượng thiết yếu, có mặt trong tất cả các cơ quan và tế bào của cơ thể, cũng là một thành phần quan trọng trong quá trình tổng hợp vitamin B12 và một số enzym. Tuy nhiên, khi hấp thụ

coban với hàm lượng quá cao có thể gây hại nghiêm trọng cho con người, động vật và thực vật, như làm xuất hiện các triệu chứng hô hấp, làm tổn thương phổi, suy giáp, viêm da, bệnh tim, mất thính giác và thị lực. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng, khi nồng độ coban trong dung dịch đất $>10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, cây trồng có thể bị

chết. Khi nồng độ coban trong nước $>5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, cá sẽ chết [1]. Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp của Liên hợp quốc (FAO) quy định hàm lượng coban trong nước tưới không được vượt quá $100 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, nồng độ của các ion coban trong nước thải phải $< 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [1]. Vì vậy, khi hàm lượng coban trong nước vượt quá giới hạn cho phép thì cần được xử lý. Có nhiều phương pháp xử lý coban ô nhiễm trong môi trường nước nhưng phương pháp hấp phụ qua nhiều nghiên cứu đã chứng tỏ là một trong những phương pháp có triển vọng nhất do tính đơn giản, hiệu quả cao và khả năng ứng dụng trên phạm vi rộng. Trong phương pháp hấp phụ, chất hấp phụ đóng một vai trò quan trọng. Có nhiều chất hấp phụ đã được sử dụng để hấp phụ kim loại nặng theo xu hướng sử dụng vật liệu tự nhiên, thân thiện với môi trường như celulozo [2], chitin, chitosan, tinh bột [3,4], apatit [5,6], natural clay [7,8], các vật liệu mao quản trung bình chế tạo từ các vật liệu sinh khối thải [9] và các vật liệu tái chế từ phụ phẩm nông nghiệp [10,11], ... được các nhà khoa học trên thế giới hết sức quan tâm do có ưu điểm: chi phí thấp, hiệu quả hấp phụ cao, thân thiện với môi trường.

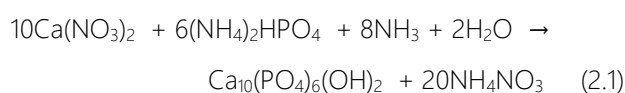
Canxi hydroxyapatit hay hydroxyapatit có công thức $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (HAp). HAp không chỉ ứng dụng trong các lĩnh vực y-sinh, dược học mà HAp còn được sử dụng trong lĩnh vực xử lý môi trường với hiệu suất xử lý cao: có thể loại bỏ một số chất và ion gây ô nhiễm trong môi trường nước như Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Hg^{2+} , $\text{Cr}(\text{III})$, $\text{As}(\text{V})$, $\text{Se}(\text{VI})$, NO_3^- , F^- , PO_4^{3-} , phenol, nitrobenzene, thuốc đỏ Công gô, Như vậy, HAp là chất hấp phụ thân thiện với môi trường, không gây độc đối với cơ thể người và là chất hấp phụ hiệu quả. Bên cạnh việc nghiên cứu hấp phụ thì giải hấp phụ và thu hồi coban cũng hết sức quan trọng để tránh ô nhiễm thứ phát, tận dụng kim loại có ích từ nguồn thải và tái sinh vật liệu hấp phụ, nâng cao hiệu quả kinh tế. Trên thế giới, các nghiên cứu về giải hấp phụ, thu hồi kim loại nặng ra khỏi vật liệu hấp phụ còn hạn chế. Một số phương pháp được sử dụng để giải hấp phụ kim loại nặng ra khỏi vật liệu như: phương pháp trao đổi ion, phương pháp sử dụng dung môi (axit, bazơ, muối, rượu etylic,...), phương pháp tạo phức, phương pháp chiết, phương pháp sử dụng nhiệt, ...[5,12,13]. Kim loại nặng sau khi rửa giải được thu hồi bằng các phương pháp: kết tủa hóa học, kết tủa điện hóa, v.v.. Trên thế giới, đã có một số công trình công bố về hấp phụ Co^{2+} dùng HAp nhưng có rất ít công bố nghiên cứu hoàn chỉnh từ hấp phụ, giải hấp, thu hồi kim loại đến tái sinh vật liệu và đặc biệt là chưa có công trình nào công bố khả năng giải hấp và thu hồi kim loại bằng cách điện phân trực tiếp vật liệu đã hấp

phụ (M-HAp) trong chất lỏng ion reline (hỗn hợp Choline Chloride-Urea). Cho đến nay, chỉ có một số công bố về khả năng kết tủa điện hóa của các ion Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} và Ni^{2+} trong dung môi reline có điểm euctecti sâu (DES) [14-16]. Phương pháp này có ưu điểm là không cần dung môi rửa giải, rút ngắn công đoạn của quá trình thu hồi kim loại, môi trường điện phân thân thiện, đồng thời vật liệu hấp phụ được tái sinh. Ở nước ta chưa có công bố nào về nghiên cứu hấp phụ, giải hấp Co^{2+} dùng HAp. Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu khả năng hấp phụ ion Co^{2+} trong nước dùng vật liệu hydroxyapatit tổng hợp. Sau đó, giải hấp phụ và thu hồi Co kim loại bằng phương pháp kết tủa điện hóa trong nền điện li reline.

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Tổng hợp vật liệu bột Hap

Bột HAp được tổng hợp bằng phương pháp kết tủa hóa học trong môi trường nước với nguyên liệu ban đầu từ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ và NH_3 (phương trình 2.1) **Error! Reference source not found.**



Bột HAp tổng hợp thu được có màu trắng, hình que với diện tích bề mặt riêng xác định theo phương pháp Brunauer, Emmett and Teller (BET) thu được là $91,42 \text{ m}^2/\text{g}$.

Hấp phụ Co^{2+} bằng bột Hap

Khảo sát khối lượng bột HAp thay đổi từ 0,1 – 0,4 g trong 50 mL dung dịch, thời gian hấp phụ biến đổi từ 5 – 60 phút tại $\text{pH} = 5,0$ (pH_0) đến khả năng hấp phụ của bột HAp đối với Co^{2+} . Hỗn hợp sau đó được khuấy với tốc độ 400 vòng/phút. Sau khi hấp phụ, lọc tách chất rắn, lấy phần dung dịch để định lượng ion Co^{2+} còn lại bằng phương pháp khối phổ plasma cao tần cảm ứng (ICP-MS) trên thiết bị ICAP Q ICP-MS (Thermo Scientific, Germany) tại Trường Đại học Mở-Địa chất.

Dung lượng hấp phụ và hiệu suất hấp phụ được xác định bằng phương trình 2.2 và 2.3 [18]:

$$Q = (C_0 - C) \times V / m \quad (2.2)$$

$$H = ((C_0 - C) / C_0) \times 100 \quad (2.3)$$

Trong đó: Q (mg/g) và H (%) lần lượt là dung lượng hấp phụ và hiệu suất hấp phụ; C_0 (mg/L) và C (mg/L) lần lượt là nồng độ ion Co^{2+} ban đầu và còn lại sau

hấp phụ; V là thể tích dung dịch hấp phụ (L); m là khối lượng bột HAp (g). Khả năng hấp phụ Co^{2+} của HAp được tính toán dựa trên đường hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich. Động học của quá trình hấp phụ được nghiên cứu theo hai mô hình động học: mô hình giả bậc 1 và mô hình giả bậc 2 [18,19].

Giải hấp phụ ion Co^{2+} và thu hồi Co kim loại bằng phương pháp kết tủa điện hóa

Chuẩn bị dung môi reline: Dung môi reline có điểm otecti sâu (DES) được tạo ra từ choline chloride (ChCl) và urea (U) bằng cách trộn lẫn hai chất rắn với tỉ lệ mol 1:2 và khuấy đều ở nhiệt độ 60 °C trong 3h cho tới khi thu được chất lỏng không màu và đồng nhất [20].

Nghiên cứu đường von-ampe vòng của Co^{2+} trong nền điện li reline: Thiết bị đo von-ampe vòng (CV) gồm 3 điện cực nhúng trong một dung dịch điện phân (reline): điện cực làm việc (WE) là điện cực Au ($S = 0,0201 \text{ cm}^2$), điện cực so sánh (RE) là điện cực Ag/AgCl/ Cl^- và điện cực phụ trợ/điện cực đối (CE) là điện cực lưới Pt. Điều kiện đo CV: 0,5 g bột Co-HAp trong 5 mL reline ở bước nhảy thế 0,005 V, tốc độ quét thế 0,02 V/S, khoảng thế quét: 0,4 ÷ -1,1 (V).

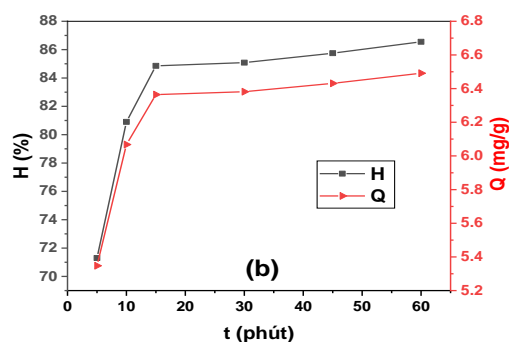
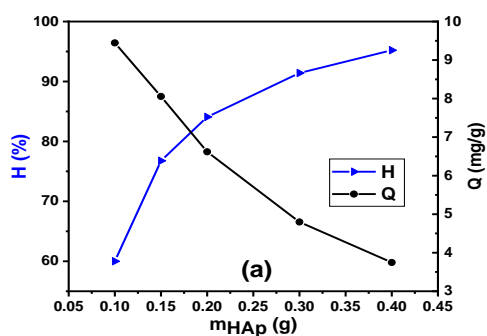
Giải hấp phụ Co^{2+} và kết tủa Co kim loại lên bề mặt điện cực Au: Quá trình giải hấp ion Co^{2+} ra khỏi vật liệu

đã hấp phụ (Co-HAp) và kết tủa kim loại Co được thực hiện trong bình điện phân dùng kỹ thuật áp dòng với ba điện cực: WE là tấm vàng (diện tích hình học = 1 cm^2), RE là điện cực bạc Ag,AgCl/ Cl^- và CE là một lưới bạch kim có diện tích lớn. Các giá trị cường độ dòng khác nhau đã được nghiên cứu: 1; 2; 3; 5; 7,5 mA ứng với thời gian điện phân được khảo sát từ 1-10 giờ, khối lượng vật liệu 0,1 g Co-HAp tại 60°C. Sau khi điện phân, bột Co-HAp được lọc ra khỏi hỗn hợp, sau đó làm sạch, sấy khô và xác định hàm lượng Co còn lại trong bột bằng phương pháp ICP-MS.

3. Kết quả và thảo luận

Nghiên cứu hấp phụ

Ảnh hưởng của khối lượng bột HAp: Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của khối lượng bột HAp đến dung lượng và hiệu suất hấp phụ Co^{2+} được trình bày trên hình 1a. Khi khối lượng bột HAp tăng từ 0,1 đến 0,4 g, hiệu suất hấp phụ tăng từ 60 đến 95,21% do sự tiếp xúc giữa chất hấp phụ và dung dịch tăng, số lượng tâm hấp phụ tăng [21]. Tuy nhiên, dung lượng hấp phụ lại giảm dần từ 9,45 xuống 3,75 mg/g. Để đạt được dung lượng và hiệu suất hấp phụ đồng thời cao (6,62 mg/g ; 84,8 %), khối lượng 0,2 g bột HAp được chọn để nghiên cứu hấp phụ Co^{2+} .



Hình 1: Ảnh hưởng của khối lượng (a) ($C_{\text{Co}^{2+}} = 50 \text{ mg/L}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 5,0$ and $t = 15$ phút) và thời gian tiếp xúc (b) đến khả năng hấp phụ Co^{2+} ($C_{\text{Co}^{2+}} = 50 \text{ mg/L}$, $m_{\text{HAp}} = 0,2 \text{ g}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 5,0$)

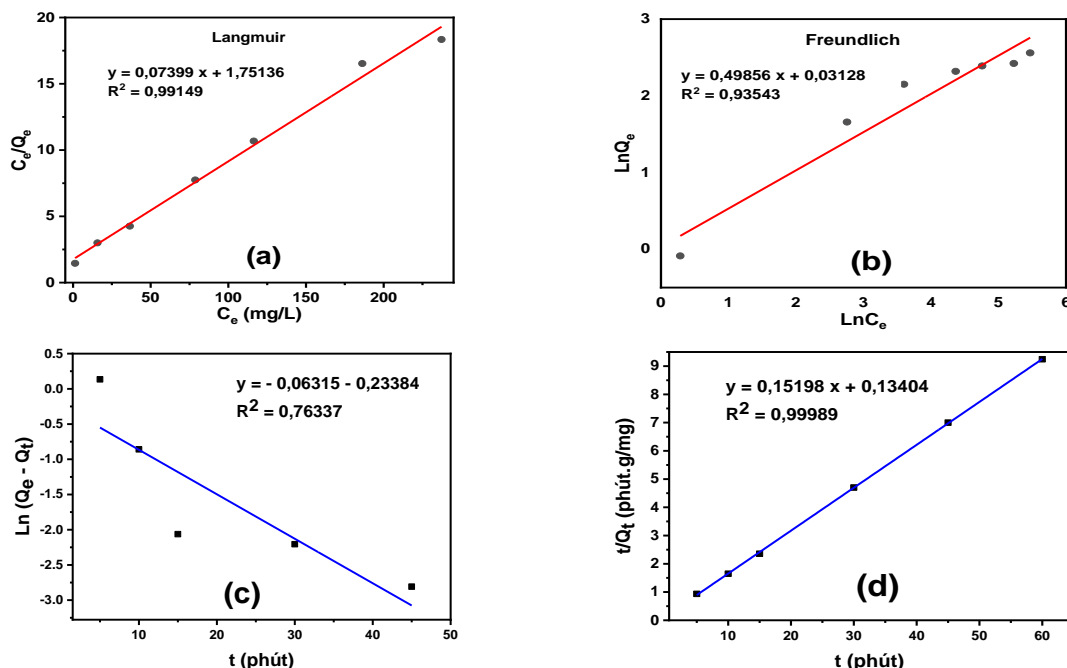
Ảnh hưởng của thời gian hấp phụ: Sự biến đổi hiệu suất và dung lượng hấp phụ của 0,2 g bột HAp theo thời gian được giới thiệu trên hình 1b. Trong khoảng thời gian khảo sát, dung lượng cũng như hiệu suất hấp phụ tăng nhanh trong 15 phút đầu, từ 15 phút trở đi dung lượng và hiệu suất hấp phụ tăng chậm và ổn định do sự hấp phụ đạt tới trạng thái cân bằng. Để thu được dung lượng và hiệu suất hấp phụ cao (6,38 mg/g và 85,08%), thời gian hấp phụ không kéo dài thì thời gian hấp phụ thích hợp được tiến hành trong 30 phút và được sử dụng cho nghiên cứu tiếp theo.

Đường đẳng nhiệt hấp phụ: Kết quả trên hình 2 cho thấy, mô hình Langmuir ($R^2 = 0,99149$) có thể được sử dụng để mô tả dữ liệu thực nghiệm của quá trình hấp phụ Co^{2+} bởi HAp trong điều kiện nghiên cứu tốt hơn mô hình Freundlich ($R^2 = 0,93543$). Điều này phù hợp với nhiều công bố trước đây về các chất hấp phụ HAp và trên cơ sở HAp đối với hấp phụ các kim loại nặng [12,18,19]. Dung lượng hấp phụ Co^{2+} cực đại (Q_{max}) theo Langmuir là 13,515 mg/g (Bảng 1). Kết quả này cho thấy, dung lượng hấp phụ cực đại nhỏ hơn so với một số công bố dùng HAp hoặc composit của HAp hấp phụ Co^{2+} nhưng hiệu suất hấp phụ đạt 85,08 % ở

nồng độ Co^{2+} 50 mg/L lại cao hơn hoặc gần tương đương [18, 22].

Động học hấp phụ: Hình 2 và bảng 1 chỉ ra, giá trị Q_e tính theo phương trình động học hấp phụ giả bậc 1 (0,791 mg/g) khác nhiều giá trị Q_e xác định từ thực nghiệm (6,492 mg/g). Trong khi đó, giá trị Q_e tính theo phương trình động học hấp phụ giả bậc 2 (6,580 mg/g) gần với Q_e xác định từ thực nghiệm. Đồng thời,

hệ số hồi quy của phương trình động học giả bậc 2 ($R^2 = 0,99989$) gần với 1 còn hệ số hồi quy của phương trình động học giả bậc 1 ($R^2 = 0,76337$) khác xa 1. Kết quả này chứng tỏ quá trình hấp phụ Co^{2+} bằng HAP tuân theo phương trình động học hấp phụ giả bậc 2. Kết quả thu được phù hợp với các công bố trước đó [12,18,19]. Hằng số tốc độ hấp phụ xác định được có giá trị bằng 0,17232 g/mg/min.



Hình 2: Đường đẳng nhiệt hấp phụ của Co^{2+} theo mô hình Langmuir (a) và Freundlich (b), động học của quá trình hấp phụ Co^{2+} lên HAP theo phương trình giả bậc 1 (c) và giả bậc 2 (d)

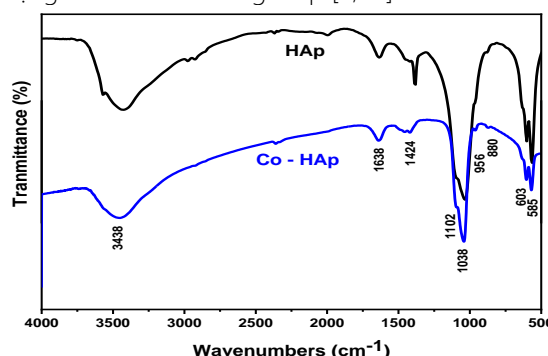
Bảng 1: Các hằng số thực nghiệm tính toán theo các phương trình Langmuir, Freundlich và các mô hình động học giả bậc 1, giả bậc 2

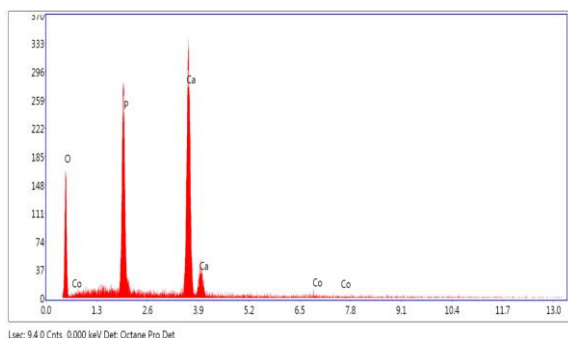
Langmuir			Freundlich			Q_e thực nghiệm (mg.g ⁻¹)
Q_m	K_L	R^2	n	K_F	R^2	
13,515	0,04224	0,99149	2,00577	1,03177	0,93543	
Mô hình động học giả bậc 1			Mô hình động học giả bậc 2			
Q_e (mg.g ⁻¹)	k_1 (phút ⁻¹)	R^2	Q_e (mg.g ⁻¹)	k_2 (g/mg/phút)	R^2	
0,791	0,06315	0,76337	6,580	0,17232	0,99989	6,492

Đặc trưng của HAP trước và sau quá trình hấp phụ

Các đặc trưng của bột HAP trước và sau quá trình hấp phụ được phân tích bằng phổ FT-IR và EDX. Phổ FT-IR (Hình 3a) cho thấy, các dải hấp thụ ở vùng 1102; 1038; 956; 603; 565 cm^{-1} đặc trưng cho nhóm PO_4^{3-} . Dải hấp thụ của liên kết P-OH nằm ở vùng 880 cm^{-1} . Dải hấp thụ của H_2O tự do nằm ở vùng 3438; 1638 cm^{-1} . Sự có mặt của Co trong HAP sau quá trình hấp phụ được khẳng định bởi phổ EDX (Hình 3b). Một số công trình

đã công bố về cơ chế trao đổi ion giữa các ion kim loại nặng M^{2+} và Ca^{2+} trong HAP [5,23].



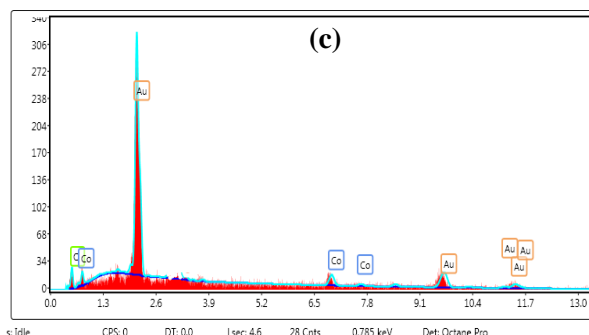
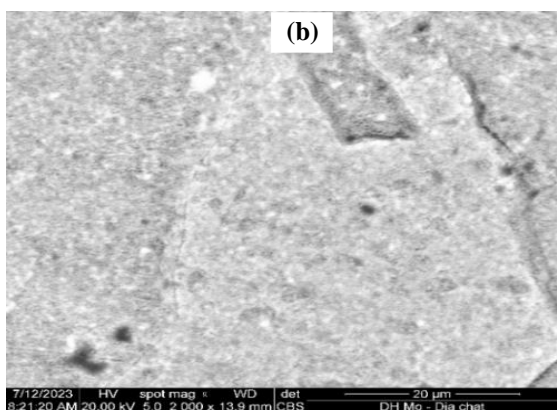
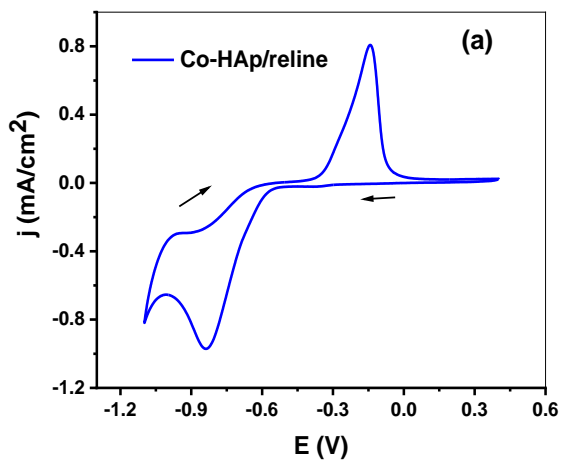


Hình 3: Phổ FT-IR của HAp trước và sau quá trình hấp phụ và phổ EDX của HAp sau quá trình hấp phụ Co^{2+}

Như vậy, một lượng Co đi vào cấu trúc tinh thể của HAp không làm thay đổi nhóm chức trong phân tử HAp.

Giải hấp phụ Co^{2+} và thu hồi Co kim loại

Trên đường CV của Co-HAp/reline chỉ ra, sự xuất hiện pic khử của Co^{2+} ở $-0,83$ V và pic oxy hóa của Co^0 ở $0,15$ V (Hình 4a). Kết quả này cho thấy, có sự dịch chuyển nhẹ các pic oxy hóa và khử so với của $\text{Co}(\text{NO}_3)_2/\text{reline}$ [16].



Hình 4: Đường CV của Co-HAp trong nền điện li reline (a); hình ảnh SEM (b) và phổ EDX (c) của bề mặt điện cực Au sau khi điện phân Co-HAp

Cơ chế kết tủa và hòa tan Co trên điện cực Au có thể được mô tả như sau [15,16]:

Giai đoạn 1: Sự tạo phức giữa Co^{2+} của Co-HAp và Cl^- trong reline (CoCl_n^{2-n}). Tiếp theo là sự khử Co^{2+} (trong CoCl_n^{2-n}) thành kim loại xảy ra trên bề mặt điện cực: $\text{CoCl}_n^{2-n} + 2e \rightarrow \text{Co} + n\text{Cl}^-$.

Giai đoạn 2: Hòa tan Co kim loại thành Co^{2+} : $\text{Co} - 2e \rightarrow \text{Co}^{2+}$

Từ kết quả đường CV của Co-HAp/reline chứng tỏ, có thể giải hấp phụ Co^{2+} từ Co-HAp và kết tủa kim loại Co lên điện cực Au bằng phương pháp điện phân cố định dòng sao cho điện thế đạt được $\leq -0,83$ V. Kết quả thu được thể hiện trên hình 4. Hình ảnh SEM chỉ ra, bề mặt điện cực Au sau điện phân có lớp kim loại bám đều. Phổ EDX cho thấy, sau khi điện phân Co-HAp, xuất hiện pic của Co trên bề mặt điện cực Au.

Để nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất giải hấp phụ và thu hồi Co, tiến hành phân cực catot (điện cực Au) ở các giá trị cường độ dòng điện đặt vào khác nhau với thời gian điện phân khác nhau ở nhiệt độ 60°C . Hiệu suất thu hồi Co được thể hiện trong bảng 2. Kết quả cho thấy, thời gian điện phân tăng dẫn đến lượng Co kết tủa trên bề mặt điện cực Au tăng nên hiệu suất thu hồi Co tăng. Cường độ dòng điện tăng thì hiệu suất thu hồi cũng tăng do sự khử Co^{2+} trong phức CoCl_n^{2-n} càng thuận lợi. Để thu được hiệu suất thu hồi Co cao (94,58%), cường độ dòng điện áp vào là 7,5 mA và thời gian điện phân 10h được chọn để thu hồi Co. So sánh với hiệu suất giải hấp ion kim loại nặng khác từ vật liệu đã hấp phụ M-HAp dùng các chất rửa giải như: HCl, NaOH, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, EDTA [23] thì hiệu suất giải hấp trong nghiên cứu này cao hơn nhiều. Mặt khác, vật liệu HAp không tan trong reline, không bị mất đi sau quá trình điện phân giải hấp phụ. Do đó có thể thu hồi lại vật liệu HAp để tái sử dụng.

Bảng 2: Ảnh hưởng của cường độ dòng điện và thời gian điện phân đến hiệu suất giải hấp phụ và thu hồi Co tại $m_{\text{Co-HAP}} = 0,1 \text{ g}$, $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

I (mA) t (h)	H %				
	1	2	3	5	7.5
1	52,38	57,35	64,24	70,92	73,28
2	57,08	61,18	68,69	74,60	76,95
3	62,69	66,34	71,92	78,35	80,48
4	66,04	70,85	74,91	81,68	84,54
5	70,15	74,48	78,48	84,72	86,59
7	73,55	77,69	82,60	87,29	92,46
10	76,42	81,53	86,10	90,05	94,58

4. Kết luận

HAP đã được sử dụng để nghiên cứu quá trình hấp phụ và giải hấp ion Co^{2+} . Kết quả thu được cho thấy, tại nồng độ Co^{2+} 50 mg/L ở điều kiện hấp phụ thích hợp, dung lượng và hiệu suất hấp phụ đạt 6,38 mg/g và 85,08%. Quá trình hấp phụ tuân theo mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir với dung lượng hấp phụ cực đại bằng 13,515 mg/g và tuân theo mô hình động học giả bậc 2. Quá trình giải hấp phụ Co^{2+} và thu hồi Co kim loại phụ thuộc vào cường độ dòng điện và thời gian điện phân. Hiệu suất thu hồi Co đạt tới 94,58% ở điều kiện thích hợp. Kết quả này mở ra triển vọng cho việc ứng dụng HAP loại bỏ ion Co^{2+} trong nước bị ô nhiễm và thu hồi kim loại Co để tận dụng và tránh ô nhiễm thứ phát cũng như tái sử dụng vật liệu hấp phụ.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2022-MDA-03.

Tài liệu tham khảo

1. F. Ma, W. Zhu, W. Cheng, J. Chen, J. Gao, Y. Xue, Y. Yan, *J. Water Proc. Engineering* 53 (2023) 103635. <https://10.1016/j.jwpe.2023.103635>
2. J. Kushwaha, R. Singh, *Inorg. Chem. Commun.* 152 (2023) 110721. <https://10.1016/j.inoche.2023.110721>
3. H. Motaghi, P. Arabkhani, M. Parvinnia, A. Asfaram, *Sep. Purif. Technol.* 284 (2022) 120258. <https://10.1016/j.seppur.2021.120258>
4. M. Rajiv Gandhi, G.N. Kousalya, S. Meenakshi, *Int. J. Biol. Macromol.* 48 (2011) 119-124.

- <https://10.1016/j.ijbiomac.2010.10.009>
5. P. Chand, Y.B. Pakade, *Environ Sci Pollut Res Int.* 22 (2015) 10919-10929. <https://10.1007/s11356-015-4276-2>
 6. X. Liu, H. Yin, H. Liu, Y. Cai, X. Qi, Z. Dang, *J Hazard Mater* 443 (2023) 130167. <https://10.1016/j.jhazmat.2022.130167>
 7. I. Anastopoulos, A. Mittal, M. Usman, J. Mittal, G. Yu, A. Núñez-Delgado, M. Kornaros, *Mol. Liq.* 269 (2018) 855-868. <https://10.1016/j.molliq.2018.08.104>
 8. H. Li, J. Zhang, Y. Zhang, H. Huang, H. Ou, Y. Zhang, *Sep. Purif. Technol.* 319 (2023) 124058. <https://10.1016/j.seppur.2023.124058>
 9. M.A. Islam, M.J. Ahmed, W.A. Khanday, M. Asif, B.H. Hameed, *Ecotoxicol Environ Saf* 138 (2017) 279-285. <https://10.1016/j.ecoenv.2017.01.010>
 10. Y. Wu, J. Ming, W. Zhou, N. Xiao, J. Cai, *Sci Total Environ*, 884 (2023) 163887. <https://10.1016/j.scitotenv.2023.163887>
 11. M. Hamzaoui, B. Bestani, N. Benderdouche, *J. Mater. Environ. Sci.* 9(4) (2018) 1110-1118. <https://10.26872/jmes.2018.9.4.122>
 12. V.T. Le, T.K.N. Tran, D.L. Tran, H.S. Le, V.D. Doan, Q.D. Bui, H.T. Nguyen, *J. Dispers. Sci. Technol.* 40 (2019) 1761-1776. <https://10.1080/01932691.2018.1541414>
 13. V.X. Minh, K.T.T. Dung, P.T. Lan, L.T.M. Hanh, N.T. Dung, *Vietnam J. Chem.* 58 (2020) 358-363. <https://10.1002/vjch.2019000195>
 14. P. Sebastián, E. Gómez, V. Climent, J.M. Feliu, *Electrochem. Commun.* 78 (2017) 51-55. <https://10.1016/j.elecom.2017.03.020>
 15. A. Shishov, A. Bulatov, M. Locatelli, S. Carradori, V. Andrich, *Microchem. J.* 135 (2017) 33-38. <https://10.1016/j.microc.2017.07.015>
 16. J.G.d.R.d. Costa, J.M. Costa, A.F.d. Almeida Neto, *Metals*, 12 (2022) 2095. <https://10.3390/met12122095>
 17. D.T. Le, T.P.T. Le, H.T. Do, H.T. Vo, N.T. Pham, T.T. Nguyen, H.T. Cao, P.T. Nguyen, T.M.T. Dinh, H.V. Le, D.L. Tran, *J. Chem.* 2019 (2019). <https://10.1155/2019/8620181>
 18. N. Gupta, A.K. Kushwaha, M.C. Chattopadhyaya, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 43 (2012) 125-131. <https://10.1016/j.jtice.2011.07.009>
 19. Y. Si, J. Hou, H. Yin, A. Wang, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 18 (2018) 3484-3491. <https://10.1166/jnn.2018.14631>
 20. Q. Rayée, T. Doneux, C. Buess-Herman, *Electrochim. Acta* 237 (2017) 127-132. [doi:10.1016/j.electacta.2017.03.182](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.182)
 21. W. Dou, Z. Deng, J. Fan, Q. Lin, Y. Wu, Y. Ma, Z. Li, *Appl. Clay Sci.* 229 (2022) 106693. <https://10.1016/j.clay.2022.106693>
 22. R. Foroutan, S.J. Peighambaridoust, A. Ahmadi, A. Akbari, S. Farjadfard, B. Ramavandi, *J. Environ. Chem. Eng.* 9 (2021) 105709. <https://10.1016/j.jece.2021.105709>
 23. Y. Feng, J.L. Gong, G.M. Zeng, Q.Y. Niu, H.Y. Zhang, C.G. Niu, J.H. Deng, M. Yan, *J. Chem. Eng.* 162 (2010) 487-494. <https://10.1016/j.cej.2010.05.049>